复合材料结构瞬态热力耦合问题多尺度分析方法

万建军

摘要

复合材料具有良好的物理、力学性能，在航空航天、汽车、医学、建筑等行业得到广泛应用。随着复合材料应用的深入，必须考虑复合材料结构的多物理场耦合行为；特别是随着各种超常规服役环境的出现，使得复合材料结构的热、力场耦合行为更加复杂。因此，有必要发展高效的数学、物理、力学方法来预测复合材料结构在热力耦合环境下的动态响应。

周期性复合材料在工程应用中比较广泛，在力学和数学上已经发展了诸多预测周期复合材料性能的方法，包括细观力学方法、均匀化方法和多尺度方法等。从工程实际应用来看，复合材料结构最常见的多物理场耦合服役环境是热、力场耦合的环境。本文将主要研究预测周期复合材料结构在动态热力载荷下耦合热弹性行为的多尺度分析方法。

本文的第一部分研究了周期结构复合材料经典瞬态耦合热弹性问题的多尺度分析方法。首先给出了周期复合材料热弹性模型并证明了解的存在唯一性，并使用构造性的多尺度分析方法定义了复合材料结构瞬态耦合的位移场和温度增量场的一阶和二阶双尺度渐近解，它们能够反映复合材料结构在动态热力耦合载荷下的宏 - 细观响应。还得到了复合材料的等效参数以及与原问题相应的均匀化问题，并证明了用一阶和二阶渐近解作为逼近解时的逼近阶。在理论分析基础上，给出了周期复合材料热弹性问题的双尺度有限元算法，并针对层叠复合材料进行了双尺度有限元计算，得到了复合材料中夹杂的体分比对材料等效性能影响的定量描述，数值试验的结果验证了算法的有效性。

本文的第二部分研究了周期复合材料的具有热松弛性质的 G-L 型瞬态耦合热弹性问题的多尺度分析方法。引入了周期复合材料的 G-L 型广义热弹性模型，证明了解的存在唯一性。构造性的定义了复合材料结构的位移场和温度增量场的一阶和二阶双尺度渐近解以及与原问题相应的均匀化问题，并证明了一阶和二阶双尺度渐近解的逼近阶。还给出了层叠复合材料 G-L 型热弹性问题的多尺度分析结果。最后给出了周期复合材料 G-L 型广义热弹性问题的双尺度有限元算法，并针对层叠复合材料的 G-L 型热弹性问题进行了数值计算，数值试验的结果表明了算法的可行性。

本文给出了针对周期性复合材料瞬态热力耦合问题的多尺度分析方法，对于类似的瞬态耦合多物理场问题的分析具有普遍的应用价值。而本文给出的一阶和二阶双尺度有限元算法，可以有效地用于预测周期复合材料的宏观热弹性性能和宏 - 细观耦合的微细观动态响应。

关键词：周期复合材料，瞬态热力耦合，广义热弹性，多尺度分析，双尺度有限元算法